

# Ozon profillerinde lamine yapıyı etkileyen dinamik süreçler: Ankara örneği

**Ceyhan KAHYA\*, Selahattin İNCECİK**

*İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Meteoroloji Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul*

## Özet

*Günümüzde Montreal Protokolü ile kontrol altına alınan klor ve brom içeren ve ozona zarar veren kimyasal bileşikler nedeniyle stratosferik ozon son 30 yıldır azalmaktadır. Stratosferik ozon ve iklim arasında oldukça karmaşık etkileşimler bulunmaktadır. Stratosferik sıcaklık ve taşınımında meydana gelen değişimler stratosferik ozonun dağılımına ve konsantrasyonuna etki etmekte; iklim değişimleri stratosferik sirkülasyonu etkilemekte; stratosferik ozonda meydana gelen değişimler atmosferin radyatif bütçesini ve buna bağlı olarak da iklimini etkilemektedir. Kuzey yarıküre orta enlemlerinde ozon, dinamik etkilere duyarlıdır. Kış sonu ilkbahar başında hem aşağı stratosferden düşey taşınım hem de yatay izentropik taşınım orta enlem aşağı stratosfer bölgelerinde ozon değişkenliği üzerine katkı yapmaktadır. Ozonsonde ile ölçülen ozon verileri ozonun maksimum değeri altında düz bir profile sahip değildir. Özellikle kış mevsimi ya da ilkbaharda elde edilen ozon profillerinde ozon konsantrasyonunun bir sonucu olarak artan ya da azalan ince bir tabaka şeklinde gözlenen bu yapıya lamine ya da filament adı verilir. Lamine yapıyı etkileyen olası termik ve dinamik etkenlerin, seçilen bölge üzerinde etkili olan parametreleri ve bu parametrelerin etki şekillerinin ortaya çıkarılması hedeflenmektedir. Bu çalışmada Ankara'da bulunan ozonsonde istasyonundan alınan 1997-2008 dönemine ait ozon profillerinin lamine yapıları ile troposferik ve stratosferik davranışları araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar bu bölgede hakim olan salınımlar, solar döngü gibi dinamik etkiler yardımıyla incelenmiş; 395, 475 ve 600K seviyeleri izentropik analizleri yapılmıştır. Ozon profillerinin 2005-2008 arasındaki değişimleri ENVISAT'a ait SCIAMACHY uydusundan alınan aynı döneme ait ozon profilleriyle de karşılaştırılmıştır. Sonuçlar lamine yapının özellikle kış ve ilkbahar mevsiminde görüldüğünü ortaya koymakta ve lamine yapıdaki artış toplam ozonda da artışa neden olmaktadır.*

**Anahtar Kelimeler:** Ozon, lamine, dinamik süreçler.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Ceyhan KAHYA. [ckahya@itu.edu.tr](mailto:ckahya@itu.edu.tr); Tel: (212) 285 68 42.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Meteoroloji Mühendisliği Programında tamamlanmış olan "Avrupa orta enlemlerinde ozonun lamine yapısı üzerindeki dinamik etkilerin araştırılması" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 31.05.2010 tarihinde dergiye ulaşmış, 17.06.2010 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.08.2011 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Bu makaleye "Kahya, C., İncecik, S., (2011) 'Ozon profillerinde lamine yapıyı etkileyen dinamik süreçler: Ankara örneği', İTÜ Dergisi/D Mühendislik, 10: 3, 125-136" şeklinde atıf yapabilirsiniz.

## Dynamical processes effecting laminar structure in ozone profiles: A case study of Ankara

### Extended abstract

Stratospheric ozone has been depleted over the last 30 years due to chlorine and bromine containing chemicals that are regulated under the Montreal Protocol nowadays. There is a complex interaction between stratospheric ozone and climate. Changes in stratospheric transport and temperature effect the concentration and distribution of stratospheric ozone; changes in climate effect stratospheric circulation; changes in stratospheric ozone influence radiation budget of the atmosphere and climate. Ozone in the mid-latitudes of Northern Hemisphere is sensitive to dynamical effects. During late winter and early spring both vertical transport and horizontal isentropic transport from the lower stratosphere contribute to ozone variability in the lower stratosphere over mid-latitudes. As well as the information ozone soundings have provided on the vertical distribution of ozone, they are the source of knowledge on ozone amounts. Ozonesondes are the instruments providing year-round profiles of ozone through the lowermost stratosphere of Northern Hemisphere. Measurements of the vertical profile of ozone concentration by balloon-borne ECC (Electrochemical Concentration Cell) ozonesondes have been made since 1994 at least once in a month in Ankara. The ozone profiles measured by ozonesondes do not display a smooth shape below the maximum of the ozone layer. Relatively narrow layers of substantially increased or depressed ozone observed in the measured ozone profiles in the late winter and early spring is called laminae or filament. Laminae basically occur between the tropopause and the ozone maximum and is confined to lower stratosphere. The occurrence frequency reveals a very strong seasonal variation with early spring maximum and fall minimum. In recent years the existence of the layers with depleted and enhanced ozone mixing ratios has been reported. The first systematic analysis of the laminated ozone structure was reported by Dobson (1973). In his analysis the criteria for the detection of the laminae in a certain height distance was the change of ozone to be greater than 3 mPa. It has been found that the features of laminae vary with season and latitude. Various further studies with different analysis methods have shown that the laminar structure varies with season, latitude,

and the effects of dynamical processes. Laminae in ozonesonde profiles have been used in several studies as an indicator of transport. Following Reid and Vaughan (1991) laminae is defined as a sharp phenomenon deviated from the general shape of an ozone profile by at least 20 nanobars, in order not to confuse with gravity waves.

In this study it is aimed to examine the thermal and dynamical effects on the laminar structure and the parameters effecting the study area. Upper level temperatures, pressure heights, potential vorticity, oscillation indices, solar cycle, polar vortex are the most effective of all parameters. Ozone profiles of Ankara-Turkey ozone sounding station for the period 1997-2008 were processed. The data was obtained from WOUDC (World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre) and TSMS (Turkish State Meteorological Service). Since the data of ozonesondes for the period of 2001-2004 were missing due to software difference problem between WOUDC and TSMS, the laminar structure of the profiles of 1997-2001 and 2004-2008 were examined. The results were compared with the dynamical effects of the region and isentropic analysis were made for the 395 K, 475 K and 600 K isentropic levels respectively. The variation of the profiles for the 2005-2008 period were compared with ENVISAT (Environmental Satellite) SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric ChartographY) data. Ozonesondes were examined for six pressure levels; ground-630 hPa; 630-400 hPa; 400-250 hPa; 250-158 hPa; 158-100 hPa and 100-30 hPa, and the trend of the ozonesonde for the selected time range was identified. The ground-level trends are found to be larger in general than those in the rest five atmospheric layers. Since laminae is minor compared to the total column ozone, the relation between the indices of the AO (Arctic Oscillation) and NAO (North Atlantic Oscillation) and the total ozone content obtained from TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer)-OMI (Ozone Monitoring Instrument) measurements are examined. The results show that the overall ozone content in laminae has a strong seasonal variation with a maximum in late winter/early spring and a minimum in fall. Laminae seem to contribute to seasonal variation of trends in total ozone. The ozonesonde trend is found to be positive for the selected time range.

**Keywords:** Ozone, laminae, dynamical effects.

## Giriş

Günümüzde Montreal Protokolü ile kontrol altına alınan klor ve brom içeren ve ozona zarar veren kimyasal bileşikler nedeniyle son 30 yıldır stratosferik ozon azalmaktadır. Stratosferik ozon ve iklim arasında oldukça karmaşık etkileşimler bulunmaktadır. Stratosferik sıcaklık ve taşınımında meydana gelen değişimler stratosferik ozonun dağılımına ve konsantrasyonuna etki etmekte; iklim değişimleri stratosferik sirkülasyonu etkilemekte; stratosferik ozonda meydana gelen değişimler atmosferin radyatif bütçesini ve buna bağlı olarak da iklimini etkilemektedir.

Kuzey yarıküre orta enlemleri ve Arktik bölgede ozon dinamik etkilere duyarlıdır. Kış sonu ilkbahar başında hem aşağı stratosferden düşey taşınım hem de yatay izentropik taşınım orta enlem aşağı stratosfer bölgelerinde ozon değişkenliği üzerine katkı yapmaktadır. Ozon, ultraviyole (UV) radyasyonun arz atmosferine nüfuz etmesini önleyerek, arzın radyasyon bütçesinde önemli bir rol oynar. Ozon tarafından emilen ultraviyole radyasyon tropopoz (10-15 km) ile stratopoz (50 km) arasında atmosfer ısısının ana kaynağıdır. 1980lerden itibaren küresel ozondaki değişimin nedenlerinin araştırılmasına dayalı olarak uzun dönem ozon trendi önem kazanmıştır. Stratosfer arz atmosferinde maksimum ozon konsantrasyonunun ortaya çıktığı atmosfer bölgesidir. Bu atmosfer tabakası UV radyasyonun dünya atmosferini ve yüzeyini etkilemesini önlemektedir. Diğer taraftan tropopoz bölgesindeki ozon konsantrasyonu ise bir atmosferik kirlenici olarak küresel ısınmaya yol açar. Bundan dolayı stratosfer ve troposferde ozon konsantrasyon değişimlerinin anlaşılması atmosfer bilimlari alanında büyük öneme sahiptir.

Yukarı atmosferde yapılan araştırmalar, toplam ozon dağılımının hava paternleri ya da bunları etkileyen dinamik sistemlerle değiştiğini göstermektedir. Özellikle orta enlemlerde aşağı stratosfer ile, orta ve yukarı troposferde jeopotansiyel yükseklik, potansiyel vortisiti, daha yukarı enlemlerde ise polar vorteks ile ozon arasında belirgin bir ilişkinin varlığı doğrulanmaktadır. Bu durum ozonun düşey profili üzerinde yapılan araştırmalarda ortaya çıkan ozonun la-

mine (filament) yapısı ve bunu etkileyen süreçlerle doğrulanmaktadır. (Reid vd., 2000). Ozon profillerinde gözlenen bu filament yapı, konsantrasyonun maksimum ya da minimum olarak düşeyde birkaç yüz metreye kadar genişleyebileceği bir yapı olarak ifade edilebilir. Tek bir ozon profilinde birden fazla lamine yapı görülebilir ve bu tür durumlarda ozon açısından zengin ya da fakir havanın varlığından sözedilebilir (Lemoine, 2004). Çalışmalar aşağı stratosferdeki hava kütlelerinin troposferik hava kütlelerinden yüksek oranda etkilendiğini göstermektedir (Grewe vd., 2002). Aşağı stratosferdeki dinamik süreçlerin ozonun karışma oranı üzerinde etkili olduğu sonucu varılan ortak noktadır.

## Ozon profillerinde lamine yapı

Ozonun stratosferdeki lamine yapısına ilişkin ilk çalışma Dobson (1973) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada lamine yapının varlığı ozonun belirli aralıklarla 3 mPa'dan (30 nb) daha fazla değişim göstermesi temeline dayandırılmıştır. Özellikle ilkbahar mevsiminde yukarı enlemlerde kısmi basınç profillerine dayalı belirgin bir lamine yapının varlığından söz edilmektedir. Genel olarak kuzey yarıkürede lamine yapıya Ocak-Nisan ayları arasında rastlanmaktadır. Dobson, lamine yapının subtropikal jet akımının yakınında gözlenen stratosfer-troposfer alışverişinin bir sonucu olduğunu ifade etmektedir. Reid ve Vaughan (1991 ve 1993) ise yaptıkları çalışmada 9.5 ile 21.5 km arasındaki ozonun lamine yapısını incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlarda lamine olayının polar vorteks etkisi altında filament yapıyı değiştiren bir süreci işaret edebileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca lamine olayının subtropiklerden kutuplara kadar her iki yarıküre için de kış-ilkbahar mevsimine ait bir olay olduğunu, daha sıklıkla 12-18 km arasında görüldüğünü ve polar vorteksin varlığıyla ilişkilendirilebileceğini ifade etmişlerdir. Dünyanın çeşitli bölgelerinde ozon profillerinde pozitif ve negatif yönde değişen ince tabakaların yereldiğini göstermişlerdir. Dobson'dan (1973) farklı olarak Reid ve Vaughan'a (1991) göre lamine yapının varlığı izentropik yüzeyler üzerinde ani artış gösteren ozon kısmi basıncının gözlemlendiği polar vorteksin alt kenarında oluşan polar gece jetlerinin bir sonucudur. Polar vorteksin alt kenarında gözlenen bu mekanizmanın ozonu orta

enlemlere özellikle polar vorteksin etkisini yitirdiği ilkbahar mevsiminde lamine yapı olarak taşıdığı öne sürülmüştür (Lemoine, 2004). Subtropiklerde az da olsa karşılaşılan lamine yapıya tropiklerde rastlanmamıştır.

Lamine yapı konusunda Varotsos ve diğerleri (1994) tarafından 29 istasyondan elde edilen 1991-92 kış dönemi ozonsonde verileri kullanılarak yapılan çalışmada, lamine yapıya aşağı stratosfer ağırlıklı olarak sıklıkla rastlandığı belirtilmiştir. Bunun yanı sıra 14-17 km arasında ozon kısmi basıncında belirgin bir minimumdan bahsedilmektedir. Varotsos çalışmasında ozon profillerindeki lamine yapının aşağı stratosferdeki kuzey-kuzeybatı sirkülasyonu ile ilişkili olduğu ve ozon minimumundaki belirgin azalmanın subtropikal jet akımı sirkülasyonu ile bağlantılı olduğu sonucuna varmıştır.

Logan (1999) kuzey yarıküre ozonsonde verisini kullanarak aşağı stratosferde ozon değişimini araştırmıştır. Mart ayından Eylül'e kadar tropopoz ve 100 hPa seviyeler arasında, tropopoz yüksekliğindeki artış sebebiyle ozon miktarında azalma gözlemiştir. Fujiwara ve diğerleri (2000) ise Endonezya üzerinde beş yıllık ozonsonde ölçümelerini kullanarak troposferik ozonun mevsimsel değişimlerini ortaya koymuştur. Bu mevsimsel değişimler kuru mevsimde ozonun diğer mevsimlere göre arttığını ortaya koymuştur. Tarasick ve diğerleri (2005) Kanada'da bulunan altı ECC ozonsonde istasyonundan elde edilen 1980-2001 dönemine ait ozon verilerini kullanarak yaptıkları çalışmada, 20 hPa altındaki ozonda genel bir düşüş gözlenirken, 1993'ten başlamak üzere troposferik ve stratosferik ozonda pozitif bir trendin varlığı belirlenmiştir. Bu artış trendinin ortalama tropopoz yüksekliğiyle değil, kış dönemi lamine yapı oluşma frekansı ile ilişkili olduğu ortaya konmuştur. Lastovicka ve Krizan (2006) ise ozon profillerindeki lamine yapı trendi ile orta enlem atmosferik parametreleri arasında bir bağlantı araştırmıştır. Elde edilen sonuçlarda 1990'lardan itibaren kuzey yarıkürenin lamine yapısındaki genel ozon içeriğinin ve orta enlemlerdeki toplam ozon miktarının kuvvetli negatiften pozitive döndüğü ve bu durumun bu dönemdeki lamine yapı ve toplam

ozon trendlerinin kimyasal etkilerden çok dinamik etkilerin bir sonucu olduğu, kuzey yarıkürede üst orta enlemlerde 90-95 km civarında zonal rüzgar trendinin negatif safhadan pozitive geçtiği gösterilmiştir.

Daha önce lamine ile ilgili olarak yapılan çalışmalarda araştırmaların Türkiye'yi kapsayacak şekilde yapılmamış olması, lamine yapının Türkiye üzerindeki davranışının incelenmesine olanak tanımamıştır. Bu nedenle bu çalışmada daha önce yapılan çalışmalardan farklı olarak önemli bir eksiği gidermek adına Ankara-Türkiye ECC ozonsonde istasyonu ele alınmıştır. Yapılan çalışmalar geliştirilerek çalışma aralığı ozonun yenilenme (recovery) sürecini de kapsayan 1997-2008 dönemini içine alacak şekilde güncelleştirilmiştir. Ozonsonde ölçümlerinin ozonda görülen değişimlerin hangi yüksekliklerde meydana geldiğinin tespiti açısından en doğru ölçümü veren sistem olması, lamine yapı gibi ince bir tabakanın yerinin belirlenebilmesi açısından bu ölçüm sisteminin kullanılmasını gerektirmiştir.

#### **ECC Ozonsonde**

ECC ozonsonde cihazından elde edilen ozonsonde ölçümleri ile ozonun düşey değişimi kullanılmıştır. Bu ölçüm sistemi ozonsonde, ozonölçer ve ozonölçer verici ünitesiyle birlikte 1200 gr'lık hidrojen gazı doldurulan bir balondan ibarettir. Ozonsonde halen ozon değişimi açısından en güvenilir ve doğru bilgiyi veren ölçüm sistemi olarak kabul edilmektedir.

#### **TOMS-OMI Toplam ozon**

TOMS dünya yüzeyi üzerindeki birim alanda bulunan sütun ozonunu ya da diğer bir deyişle toplam ozonu ölçmek için kullanılan ve uydu ölçümüne dayanan bir sistemdir. TOMS ölçümleri Dobson birimi (DU) cinsinden verilmektedir. TOMS ölçümleri küresel olarak -90° ile +90° enlemleri ve -180° ile +180° boylamları arasındaki bölgeyi tarayacak kapasiteye sahiptir. Bu ölçüm sistemi 2004 yılına kadar kullanılmış, 2004 yılından itibaren yerini OMI'ye bırakmıştır. OMI, TOMS ölçüm sisteminin devamı şeklindedir ve ozon kimyası ve iklim ile ilgili diğer parametrelerin de ölçümünü yapmaktadır.

## SCIAMACHY

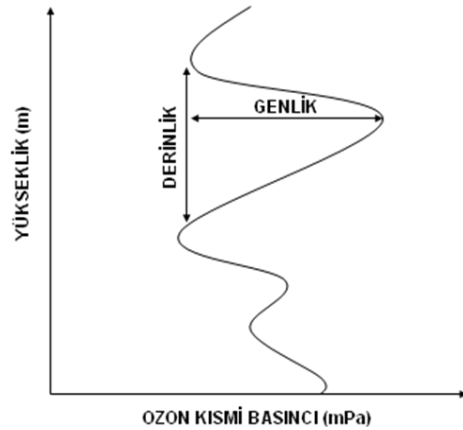
Avrupa Uzay Ajansı (ESA), Mart 2002’de ileri polar yörüngeli bir gözlem uydusu olan ve atmosfer, okyanus, kara ve buz ölçümlerini verecek ENVISAT uydusunu Fransız Guinea’sinden fırlatarak yörüngeye yerleştirmiştir. İlk dijital veriler Envisat’ın yörüngeye yerleştirilmesiyle birlikte yavaş yavaş elde edilmeye başlamıştır. ESA’nın bu en yeni uydusu bugüne kadar yapılan dünya gözlemi amaçlı uyduların en ağır ve en karmaşık yapıda olanıdır. SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric ChartographY) troposfer ve stratosferdeki iz gazlarının küresel ölçümlerini yapmak üzere kullanılan bir görüntüleme spektrofotometredir.

## Lamine yapı

Ozonsonde ile ölçülen ozon verileri 22-25 km’lerde ölçülen maksimum değeri altındaki seviyelerde düz bir profile sahip değildir. Ozon profillerinde artan ya da azalan ince bir tabaka şeklinde gözlenen bu yapıya lamine ya da filament adı verilir (Krizan ve Lastovicka, 2004). Buna göre artan yapı pozitif, azalan ise negatif lamine olarak adlandırılır. Lamine yapı kısaca ozon profillerinde rastlanan üç boyutlu yapı olarak da ifade edilebilir. Lamine yapının üç boyutlu olmasına dayalı olarak genliğinden ve derinliğinden bahsedilebilir (Şekil 1). Laminenin genliği ozonun kısmi basıncındaki fark olarak nitelendirilebilirken, derinlik bu genliğe karşılık gelen yükseklik farkı ya da dönüş noktaları olarak tanımlanabilmektedir.

Orta enlemlerde bazı parametrelerin uzun dönem trendlerinde 1990’lardan başlayarak çeşitli değişimler olduğu öne sürülmektedir, bu değişim 1970’lerden 1990 ortalarına kadar negatif eğilimdeyken, 1990 ortalarından itibaren eğilim pozitif yöndedir (Lastovicka ve Krizan, 2006). Bu parametrelerden biri olan lamine yapının araştırılmasındaki en önemli nedenlerden biri orta enlemlerde 1960’lardan 1990’lara kadar başka hiçbir parametrede bu yapıda karşılaşılan kadar pozitif ve negatif trende rastlanılmamış olmasıdır. Bulunan her bir laminede görülen ozon miktarına karşılık, toplam olarak laminede gözlenen güçlü trendlerin, orta enlemlerde top-

lam ozonda karşılaşılan güçlü trendlere neden olabilmesi ve lamine trendlerinin sirkülasyon ve taşınımındaki uzun dönem değişimleriyle ilişkili olduğunun düşünülmesi de lamine yapının önemini ortaya çıkarmaktadır (Krizan ve Lastovicka, 2005). Lamine yapı aynı güne ait lamine yapının görülmediği bir referans profiline sahip olmadığı için, tam olarak belirlenebilmesi mümkün olmayan bir parametredir. Lamine yapının belirlenmesinde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Lamine yapıda görülen ozon içeriği kullanılan lamine yapı belirleme yöntemine göre değişiklik gösterse de, uzun dönem lamine değişimleri hemen hemen yöntemden bağımsız olmakta ve birbiriyle paralellik göstermektedir (Krizan ve Lastovicka, 2006). Ozon profillerinde artan ya da azalan ozon konsantrasyonunda görülen zayıf tabakalar, yerçekimi dalgalarının sonucunda görülebilmektedir. (Reid vd., 1994; Pierce ve Grant, 1998).



Şekil 1. Ozon profilindeki lamine yapının genliği ve derinliği

Bu nedenle yapılan bu tür lamine ağırlıklı çalışmalarda lamine yapıdan bahsedilebilmesi ve yerçekimi dalgalarının etkisiyle karıştırılmaması için etkili bir büyüklük olan 30 nbar ya da daha kuzeydeki enlemler için 40 nbar üstü değerler alınmaktadır (Dobson, 1973; Lastovicka ve Krizan, 2006). Bu çalışmada da gözlenen lamine tabakanın genliğinin 30 nbar’a (3 mPa) eşit ya da daha büyük olduğu durumlar ele alınmıştır. Benzer şekilde lamine yapıdan bahsedilebilmesi için lamine derinliğinin 0.5-3.5 km arasındaki değerleri kullanılmıştır.

## Veri ve metod

Bu çalışmada, kuzey yarıkürede bulunan ve ECC ozonsonde ölçümü yapan Ankara istasyonunun 1997-2008 arasındaki 11 yıllık döneme ait 12.00 GMT ozon verileri kullanılmıştır. Araştırma bölgesi Şekil 2’de gösterilmiştir. Ankara ozonsonde istasyonunun 2001 yılına kadar olan verileri ile 2005-2008 dönemine ait verileri Toronto-Kanada’da bulunan Dünya Ozon ve Ultraviyole Radyasyon Verisi Merkezi (World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Center-WOUDC) veri tabanından elde edilmiştir. Ancak Ankara’ya ait ozonsonde verilerinin 2002-2004 yılları arasını kapsayan bölümünde, ozonsonde ölçümünü yapan Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü ile WOUDC arasında meydana gelen yazılım uyumsuzluğu nedeniyle 2002-2003 yıllarındaki veriler kullanılamamış, 2004 yılı verileri ise WOUDC yerine doğrudan Ankara’da bulunan Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ) veri tabanından temin edilmiştir.

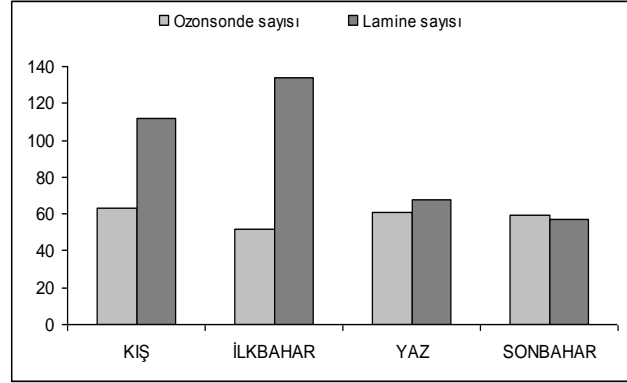


Şekil 2. ECC ölçümü yapılan Ankara ozonsonde istasyonu

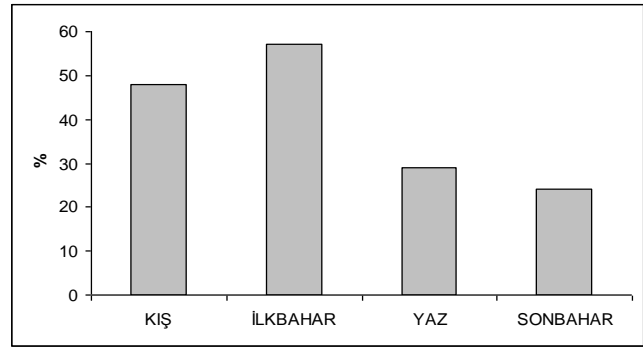
Genel olarak ozonsonde ölçümlerinde basınç, ozon kısmi basıncı, sıcaklık, rüzgar hızı ve yönü, jeopotansiyel yükseklik ve bağıl nem gibi meteorolojik parametreler elde edilmektedir. Ham olarak elde edilen bu veriler profil analizine uygulanabilir hale getirilmiş ve öncelikli olarak jeopotansiyel yükseklik, ozon kısmi basıncı, basınç ve sıcaklık değerleri kullanılarak ozon profilleri elde edilmiş ve lamine yapı araştırılmıştır.

Ozonsonde profillerinden elde edilen lamine sayıları ozonsonde sayıları ile kıyaslanmış (Şe-

kil 3) ve mevsimsel olarak, normalize edilerek sınıflandırılmıştır (Şekil 4). Elde edilen sonuçlarda daha önce yapılan çalışmalara paralel olarak laminenin kış-ilkbahar ağırlıklı bir yapı olduğu gözlenmiştir (Reid ve Vaughan, 1991; Krizan ve Lastovicka, 2004; 2005; 2006).



Şekil 3. Ozonsonde ve lamine sayılarının mevsimsel dağılımı



Şekil 4. Lamine sayılarının mevsimsel dağılım oranı

Lamine yapı aşağı stratosfer ağırlıklı olarak görülmektedir. Troposferde lamine yapı görülme sıklığı sıfıra yakın bir değerdedir.

Genel olarak lamine yapıya 15-20 km aralarında %75 sıklıkla rastlanmaktadır. Ankara üzerinde yukarı stratosferde lamine yapı görülme oranı %5 mertebesini geçmemektedir.

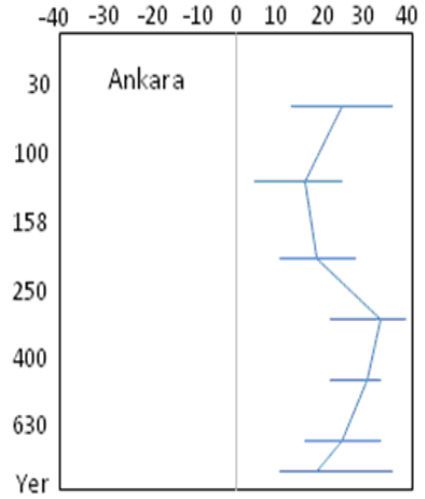
Elde edilen laminelerde lamine boyutu %82 oranında 30-35 nbar civarındadır. Benzer şekilde bir gün içerisinde 3'den fazla lamine görülme oranı Ankara üzerinde %10lar civarında tespit edilmiştir. Yerden başlayarak 30 hPa'ya kadar



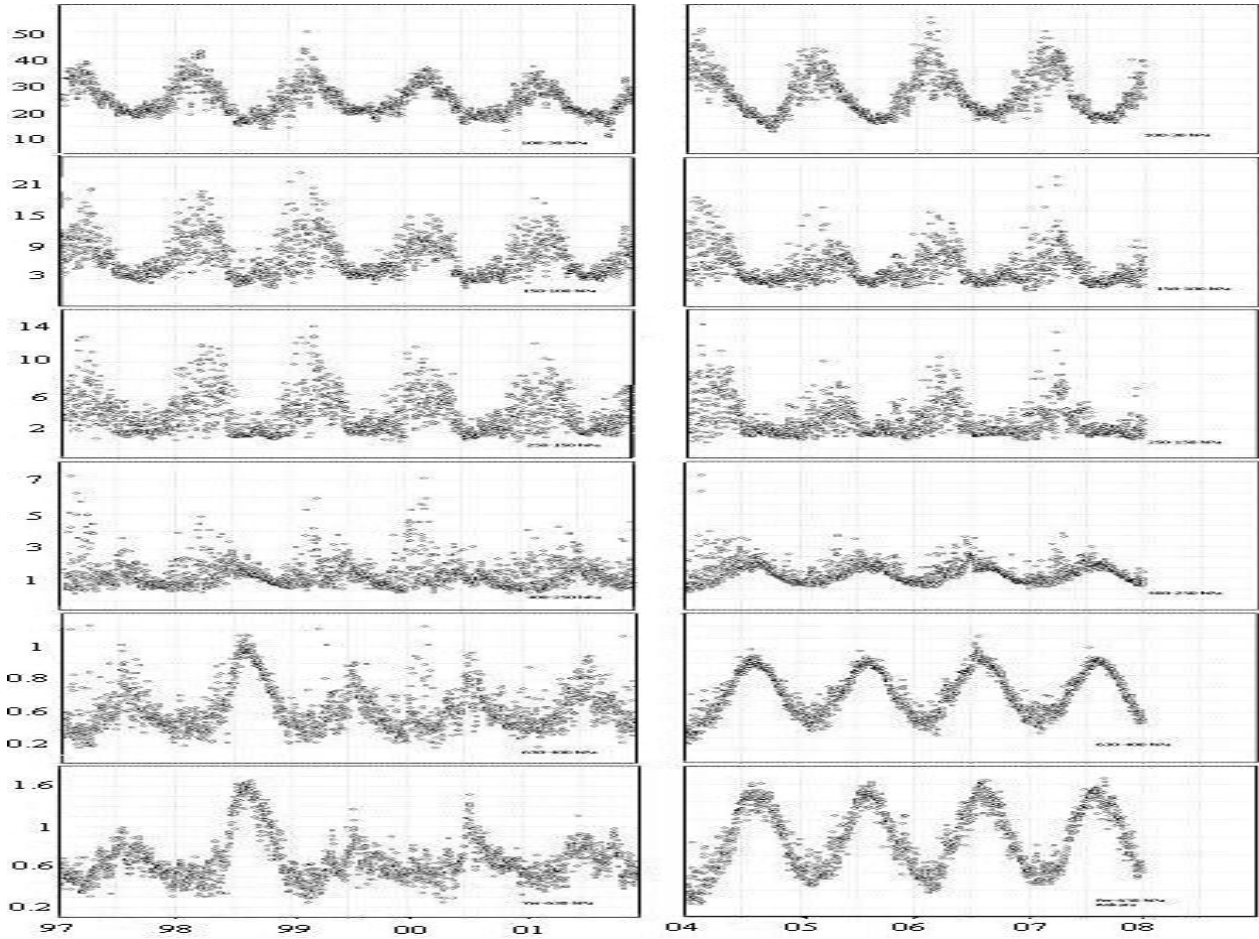
olan aralıktaki 6 tabakada hesaplanan değişim oranları altı basınç seviyesi için ayrı ayrı verilmektedir (Şekil 5). Bu tabakalar yer-630 hPa; 630-400 hPa; 400-250 hPa; 250-158 hPa; 158-100 hPa ve 100-30 hPa olarak sınıflandırılmıştır (Tarasick vd., 2005). Bu seviyelerden yer ile 250 hPa arasında kalan alan troposferi, 250-100 hPa arasındaki alan aşağı stratosferi ve 100 hPa üzeri de yukarı stratosferi temsil etmektedir.

Genel olarak incelendiğinde troposferdeki ozon dağılımının stratosferdekine göre daha karmaşık bir yapıda olduğu görülmektedir. Yer seviyesine yakın gözlenen bu durumun yer yüzeyindeki kirleticiler kaynaklı olduğu ifade edilebilir.

Özellikle ozonun yenilenme sürecine girdiği 2000li yıllardan sonra ozondaki değişim net bir şekilde görülmektedir (Şekil 6). Seçilen tüm



Şekil 5. Ozon kısmi basıncına göre troposfer ile aşağı ve yukarı stratosferdeki değişimler (x-ekseni değişim oranı, y-ekseni basınç seviyeleri olmak üzere)

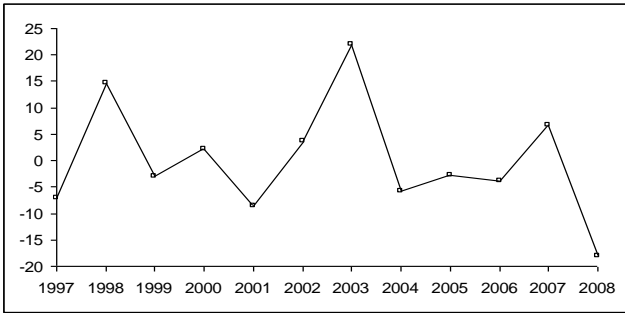


Şekil 6. 1997-2001 ve 2004-2008 arasında Ankara istasyonu ozonsonde verilerinin (en üstten en alta) 100-30 hPa, 158-100 hPa, 250-158 hPa, 400-250 hPa, 630-400 hPa ve Yer-630 hPa arasındaki değişimi (x-ekseni ozon miktarı, y-ekseni yıllar)

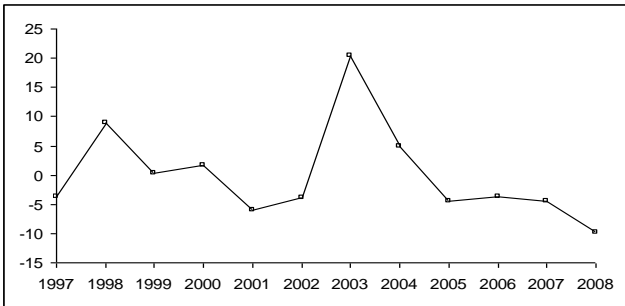
istasyonlarda gözlenen değişim ozonun azalma sürecinden artma sürecine doğru değiştiğini göstermektedir. Yukarı stratosfere çıkıldıkça ozonda gözlenen değişim azalmakta ve daha kararlı bir ozon dağılımı gözlenmektedir. Elde edilen bulgular Tarasick ve diğerleri (2005) çalışmasından elde edilen sonuçlarla paralellik göstermektedir.

### Dinamik süreçler

Kuzey yarıküre orta enlem bölgesinde toplam sütun ozonunda 1980'li yıllardan bu yana görülen azalmanın, 1990'lı yılların ortalarından itibaren değişimi pek çok araştırmacı tarafından ortaya konmuştur (Andersen ve ark., 2006; Harris ve ark., 2008). Bu değişime ait 1997-2008 yıllarını kapsayan kış ve ilkbahar toplam ozon değişimleri Şekil 7 ve 8'de verilmektedir.



Şekil 7. 1997-2008 yılları arasında kış mevsimi toplam ozon değerlerinin ortalamadan farkı



Şekil 8. 1997-2008 yılları arasında ilkbahar mevsimi toplam ozon değerlerinin ortalamadan farkı

Ankara üzerindeki değişimin bu bölge üzerinde etkili olan subtropikal jet akımları ile de ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Özellikle 200 hPa haritalarına dayalı olarak Ankara üzerinde jet akımlarının görüldüğü günlerde lamine ve buna dayalı olarak toplam ozonda bir artıştan bah-

setmek mümkündür (Kahya vd., 2005). Özellikle kuzey enlemlerinde ozon trendinde meydana gelen değişimlerin doğrudan dinamik etkenlerle ilişkili olması, toplam ozona göre dinamik değişimlere daha hassas olan lamine yapının gözönüne alınmasını gerektirmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi lamine yapı Ocak-Mayıs arasında güçlü bir mevsimsel farklılığa sahip olup, Şubat-Mart ayında en yüksek seviyesine ulaşmaktadır.

### NAO-AO

Bu çalışmada NAO (Kuzey Atlantik Salınımı) ve AO'nun (Arktik Salınım) 1997-2008 yılları arasındaki indis değerleri ile aynı döneme karşılık gelen toplam ozon (TOMS ve OMI) arasında regresyon analizi ile ilişkiler araştırılmıştır. NAO ve AO'nun toplam ozona olan etkisinin mevsimsel değişimi Tablo 1'de verilmiştir. NAO ve AO kış-ilkbahar mevsimlerinde etkili olan salınımlardır. Elde edilen NAO ve AO indisleri ile toplam ozon değerleri arasındaki korelasyon katsayıları beklendiği şekilde kış-ilkbahar mevsiminde yüksek ilişkileri ortaya koymaktadır. Ankara istasyonunda kış trendinde çok düşük de (0.18) olsa Arktik Salınım etkisinden bahsetmek mümkündür.

Tablo 1. 1997-2008 yılları arasında toplam ozon değerleri (TOMS-OMI) ile AO ve NAO indis değerlerinin mevsimsel değişimi arasındaki korelasyon katsayıları

Mevsim	AO-	AO+	NAO-	NAO+
Kış	0.11	0.18	0.04	0.08
İlkbahar	0.24	0.23	0.43	0.16
Yaz	0.03	0.25	0.64	0.91
Sonbahar	0.07	0.24	0.71	0.93

Bu sonuçlar düşey ozon profillerinde ortaya çıkan daha önce yapılan çalışmalara paralel olarak lamine yapının en çok görüldüğü kış-ilkbahar mevsiminde toplam ozon miktarının NAO ve AO indislerinden yüksek oranda etkilendiğini göstermektedir. Weiss ve diğerleri (2001), Zvyagintsev ve Kruchenitskii'nin (2003) de kuzey yarıküre için benzer bulguları elde ettiği görülmüştür.



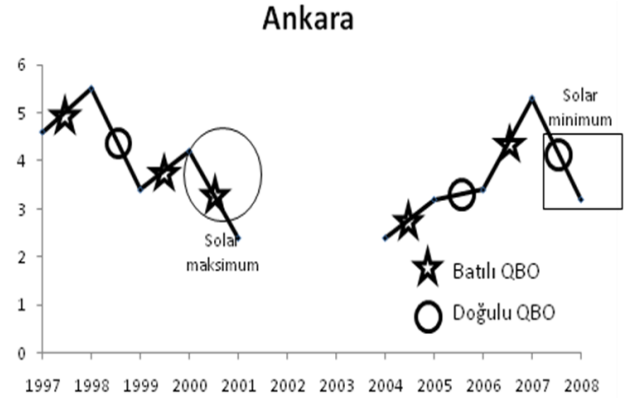
### QBO-Solar döngü

Montreal protokolünün kabul edilmesinin ardından ozon azalmasına neden olan maddelerin kullanımı düşüş göstermiştir. Dolayısıyla kimyasal ozon bozulmasının 1990larda en üst seviyeye ulaştığı ve CFClerin kullanımının azaltılmasını takiben yavaş bir süreç olmakla birlikte düşüşe geçtiği ifade edilebilir. Toplam sütun ozonundaki lineer trendin 1996 yılından itibaren 40° kutup yönlü olmak üzere belirgin şekilde değiştiği belirtilmektedir (Reinsel vd., 2005). Bu çalışmalarda en önemli problemlerden biri de belirli bir istatistiksel modele uyarlanmak istenen ozonun zaman serisinin modelde kullanılacak diğer değişkenlerle aynı zaman ölçeğinde biraraya getirilmesinin çok kolay olmamasıdır. Buna ek olarak bu değişkenlerden elde edilen korelasyonlar da farklı etkilerin ortaya konmasını zorlaştırmaktadır (Solomon vd., 1996). Bu çalışmada zaman serisinin 1997-2008 arasında olması da QBO, solar döngü gibi uzun dönemli dinamik etkilerin birbirinden ayırt edilebilmesini ve tam olarak açıklanabilmesini zorlaştırmaktadır.

Bu çalışmada ozon profillerinde ortaya çıkan lamine etkisinin araştırıldığı Ankara istasyonundan elde edilen ozon profillerindeki lamine içeriğine dayalı olarak elde edilen grafiklerde batılı ve doğulu QBolar ile maksimum ve minimum solar döngü yılları karşılaştırılmıştır (Şekil 9). Bu değişimleri sayısal olarak belirlemek amacıyla 1997-2008 dönemine ait ozon sütunundan elde edilen değişimi analiz etmek üzere çoklu lineer regresyon modeli kullanılmıştır. Bu regresyon modeli quasi-biennial salınım ve solar döngü gibi dinamik etkileri ortaya koyan açıklayıcı değişkenleri içermektedir. Bu modelde Kuzey Atlantik Salınımı ve Arktik Salınım yer almamaktadır.

Genel değişim azalan yönde %7 olarak bulunmuştur (Tablo 2). Elde edilen sonuçlarda en yüksek negatif değişim 10 yıllık süreçte %9 azalma ile Şubat ve Mart aylarındadır. Mart ayındaki bu yüksek değer polar maksimumunun bir sonucu olarak düşünülmektedir. Solomon ve diğerleri (1996) ilkbahardaki bu maksimumu heterojen kimya tarafından kontrol edilen orta

enlem ozon azalmasıyla açıklamıştır. 1997 yılından itibaren ozon artışının yaklaşık olarak 4 DU civarında olduğu görülmektedir. Brunner ve diğerleri (2006) ozondaki bu artışın Arktik ve Antarktik bölgede daha fazla olduğunu bulmuştur. Daha önce yapılan çalışmalarda QBO'nun kuzey kutbu kış/ilkbaharında çok belirgin olmayan etkisinin olduğu bulunmuştur (Oltmans ve London, 1982).



Şekil 9. x-ekseni ozon profillerinde lamine içeriği olmak üzere; batılı ve doğulu QBolar ile maksimum ve minimum solar döngü ile karşılaştırılması

Tablo 2. QBO'nun 1997-2008 döneminde mevsimsel değişimi

	Yıllık	Kış	İlkbahar	Yaz	Sonbahar
QBO10	-6.7	-7.6	-8.1	-4.5	-5.8
QBO30	-6.3	-7.4	-7.8	-3.6	-5.5

QBO'nun tüm stratosferde stratosferik ozona az ya da çok etkisinin olduğu daha önce yapılan çalışmalardan elde edilen bir sonuçtur. Ancak bu etki farklı yüksekliklerde kendisini pozitif ya da negatif olarak göstermektedir. 11 yıllık solar döngü etkisi solar UV çıktısı değişimini en iyi tanımlayan MG II solar indisi kullanılarak hesaplanmıştır (Tablo 3) (Viereck vd., 2001). Daha önce yapılan çalışmalarda ozondaki solar döngü değişimlerinin QBO'nun doğulu evresinde batılı evresindeki göre daha yüksek olduğu bulunmuştur (Steinbrecht ve ark., 2003). Bu durum QBO'nun da solar döngüden etkilenebileceği gerçeğini ortaya koymaktadır (Salby ve Callaghan, 2000).

Tablo 3. Solar döngünün 1997-2008 yılları arasındaki değişimi

	Ortalama	1 $\sigma$	Min.	Maks.	Sig
Solar	1354	510	676	3478	%95

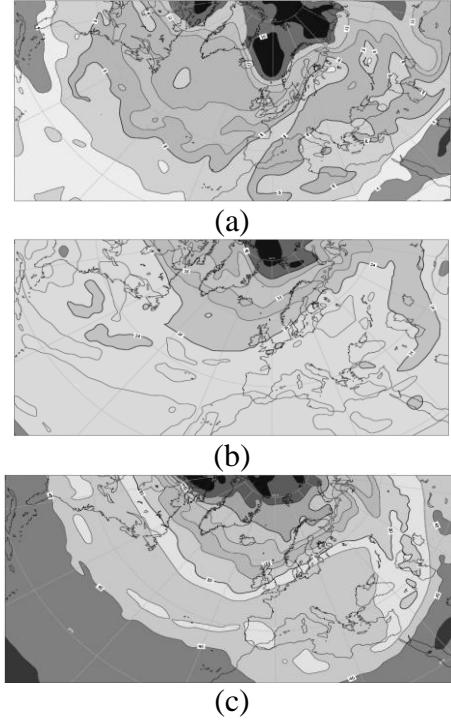
Yukarıdaki sonuçlar ışığında toplam ozonun maksimum solar döngü aktivitesi sırasında artış gösterdiği açıkça görülmektedir. Belirgin regresyon katsayıları ise  $35^\circ$  civarındadır. Orta enlemlerde solar döngü etkisi çok zayıf ve belirgin değildir. Solar döngünün etkisinin 28-32 km civarında pozitif olduğu ifade edilebilir. Bu sonuç daha önce elde edilen bazı çalışmalardaki sonuçlardan (Lee ve Smith, 2003) biraz daha düşük olmakla birlikte, Egorova ve diğerleri (2005) tarafından elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir.

#### İzentropik analiz ve potansiyel vortisiti

Bu çalışmada kullanılan ECC profillerinde gözlenen lamine sayıları ile lamine derinliği ve genlikleri sınıflandırılmıştır. Elde edilen bulgular ise ECMWF ERA-40 verilerine dayalı olarak izentropik analiz ışığında değerlendirilmiştir. İzentropik analiz sonucu bulunan potansiyel vortisitilerin troposfer seviyesi olan 395 K, alt stratosfer seviyesi olan 475 K ve orta stratosfer seviyesi olan 600 K seviyeleri gözönüne alınarak haritaları hazırlanmıştır (Şekil 10). Genel olarak bakıldığında yukarı troposfer aşağı stratosfer bölgesinde pozitif potansiyel vortisiti değişimleri görülmektedir. Bu bölgelerdeki cephe sistemleri ya da yukarı seviye hava sistemlerinin meydana getirdiği oluklarda ise negatif değerlere rastlanmaktadır. Potansiyel vortisiti haritaları troposfer-stratosfer etkileşimini doğrular niteliktedir ve beklendiği gibi aşağı stratosferde etkin bir yapının varlığından söz etmek mümkündür. Bu etki troposferde daha zayıf olarak görülmektedir. Kış-ilkbahar mevsiminde lamine yapının görülme sıklığına benzer şekilde potansiyel vortisiti haritalarında da benzer bir etkileşimden söz etmek mümkündür.

Elde edilen ozon profilleri ENVISAT'ın SCIAMACHY uydusundan alınan ozon harita-

ları ile de karşılaştırılmıştır (Şekil 11). Elde edilen sonuçlar izentropik analiz haritalarından elde edilen sonuçlarla paralellik göstermektedir. Lamine yapının çoğunun aşağı stratosferde bulunduğu belirlenmiştir. Aşağı stratosferde görülen lamine yapı frekansının büyüklüğü aynı süreçteki stratosferik ozon miktarının artmasına neden olmaktadır. Özellikle Mart-Mayıs ayları arasında bu artış en yüksek seviyesine ulaşmaktadır.



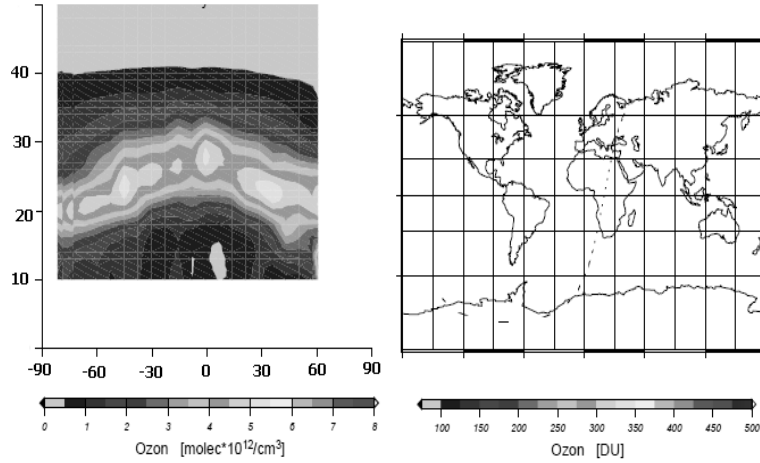
Şekil 10. (a) 395 K (b) 475 K (c) 600 K izentropik seviyeleri potansiyel vortisiti haritaları

SCIAMACHY ölçümlerinden kış-ilkbahar mevsimlerinde ozonsondeden elde edilen lamine yapı istatistiklerine paralel olarak ozon miktarında bir artıştan bahsetmek mümkündür. Bu artış özellikle aşağı stratosferde daha fazladır. Troposferde ve yukarı stratosferdeki artış miktarı ise hemen hemen birbirine paralellik göstermektedir.

#### Sonuçlar

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Lamine aşağı stratosfer ağırlıklı olarak görülmektedir. Troposferde lamine yapı görülme sıklığı sıfıra yakın bir değerdedir.



Şekil 11. SCIAMACHY ozon profillerinin yükseklik haritaları

- Lamine yapı görülme sıklığı stratosferde 15-20 kmler arasında ve %75 oranındadır. Yukarı stratosferde lamine yapı görülme oranı %5 mertebesini geçmemektedir. Bir gün içerisinde 3'den fazla lamine görülme oranı %9lar civarındadır.
- Genel ozon dağılımına bakıldığında troposferdeki dağılımın stratosferdekine göre daha karmaşık bir yapıda olduğu görülmektedir. Yer seviyesine yakın gözlenen bu durumun yer yüzündeki kirleticiler kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Yukarı stratosfere çıkıldıkça ozonda gözlenen değişim oranı azalmakta ve daha kararlı bir ozon dağılımı gözlenmektedir.
- 1997-2008 arasındaki 12 yıllık süreçte ozon değişim trendi pozitifdir.
- Toplam ozon değerleri ile NAO ve AO indisleri arasındaki korelasyon katsayıları beklendiği şekilde kış-ilkbahar mevsiminde yüksektir.
- QBOLardan elde edilen genel değişim oranı azalan yönde ve %7 olarak bulunmuştur.
- Seçilen 1997-2008 arasındaki 12 yıllık süreçte ozon değişim oranı pozitifdir.
- SCIAMACHY uydusundan alınan ozon haritalarında lamine yapının çoğunun aşağı stratosferde bulunduğu belirlenmiştir. Aşağı stratosferde görülen lamine yapı frekansının büyüklüğü aynı süreçteki stratosferik ozon miktarının artmasına neden olmaktadır. Mart-Mayıs ayları arasında stratosferik ozon miktarı en yüksek seviyesine ulaşmaktadır.

Lamine referans noktası bulunmaması nedeniyle tahmin edilmesi zor bir yapıdır. Orta enlemleri etkileyen dinamik süreçlerin bir sonucu olan

laminenin daha iyi anlaşılabilmesi için çalışma bölgesi ve veri sayısı mümkün olduğunca genişletilmeli, uzun dönemde laminenin ozonun yenilenme sürecini nasıl etkilediği araştırılmalıdır.

### Kaynaklar

- Andersen, S. B. ve diğerleri, (2006). Comparison of recent modeled and observed trends in total column ozone, *Journal of Geophysical Research*, **111**, D02303.
- Bojkov, R.D., (1995). The Chancing Ozone Layer, *World Meteorological Organization (WMO) and United Nations Environment Programme (UNEP) Note*.
- Brunner, D., J. Staehelin, J.A.Maeder, I. Wohltmann, G.E. Bodeker, (2006). Variability and trends in total and vertically resolved stratospheric ozone based on the CATO ozone data set, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **6**, 4985–5008.
- Dobson G.M.B., (1973). The laminated structure of the ozone in the atmosphere. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, **99**, 599-607.
- Fujiwara, M., K. Kita, S. Kawakami, T. Ogawa, N. Komala, S. Saraspriya and A. Suropto, (2000). Seasonal variation of tropospheric ozone in Indonesia revealed by 5-year ground-based observations. *Journal of Geophysical Research*, **105**, 1879–1888.
- Grewe, V., C. Reithmeier, d.T. Shindell, (2002). Dynamic-chemical coupling of the upper troposphere and lower stratosphere region, *Chemosphere*, **47**, 851-861.
- Harris, N.R.P. ve diğerleri (2008). Ozone trends at northern mid- and high latitudes-a European perspective, *Annales Geophysicae*, **26**, 1207-1220.
- Kahya, C., D. Demirhan, S. Topcu, S. Incecik, (2005). An Examination of the Laminar Charac-

- teristics in Ozone Profiles in Eastern and South Eastern Europe, *International Journal of Remote Sensing*, **26**, 16, 3455-3466.
- Križan, P., J. Laštovička, (2004). Definition and determination of laminae in ozone profiles, *Stud. Geophys. Geod*, **48**, 777-789.
- Križan, P., J. Laštovička, (2005). Trends in positive and negative ozone laminae in the Northern Hemisphere, *Journal of Geophysical Research*, **110**, D10107.
- Križan, P., J. Laštovička, (2006). Ozone laminae: Comparison of the southern and northern hemisphere, and tentative explanation of trends, *Journal of Atmospheric and solar-terrestrial physics*, **68**, 1962-1972.
- Laštovička, J., ve P. Križan, (2006). Trends in laminae in ozone profiles in relation to trends in some other middle atmospheric parameters, *Physics and Chemistry of the earth*, **32**, 46-53
- Lee, H. ve A. K. Smith, (2003). Simulation of the combined effects of solar cycle, quasi-biennial oscillation, and volcanic forcing on stratospheric ozone changes in recent decades, *Journal of Geophysical Research*, **108**, ACH 4.
- Lemoine, R., (2004): Secondary maxima in ozone profiles, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **4**, 1085-1096.
- Logan, J.A., (1999). An analysis of ozonesonde data for the troposphere: recommendations for testing 3-D models and development of a gridded climatology for tropospheric ozone. *Journal of Geophysical Research*, **104**, 16115-16149.
- Narayana, R.T., S. Kirkwood, J. Arvelius, P. Von der Gathen, R. Kivi, (2003). Climatology of UTLS ozone and the ratio of ozone and potential vorticity over northern Europe, *Journal of Geophysical Research*, **108**, 148-227.
- Oltmans, S. J., ve J. London, (1982). The quasi-biennial oscillation in atmospheric ozone. *Journal of Geophysical Research*, **87**, 8981-8989.
- Pierce, R.B., W.B. Grant, (1998). Seasonal evolution of Rossby and gravity wave induced laminae in ozonesonde data obtained from Wallops Island, Virginia, *Geophysical research Letters*, **25**, 1859-1862.
- Reid, S.J. ve G. Vaughan, (1991). Lamination in ozone profiles in the lower stratosphere, *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, **117**, 825-844.
- Reid, S.J. ve G. Vaughan, (1993). Ozone laminae near the edge of the stratospheric polar vortex. *Journal of Geophysical Research*, **98**, 8883-8890.
- Reid, S.J., Vaughan, G., Mitchell, N., Prichard, I.T., Smith, H.G.J., Jorgensen, T.S., Varotsos, C. H. de Backer, (1994). Distribution of ozone laminae during EASOE and the possible influence of inertia-gravity waves. *Geophysical Research Letters*, **21**.
- Reid, S., A. Tuck, G. Kladis, (2000). On the changing abundance of ozone minima at northern midlatitudes. *Journal of Geophysical Research*, **105**, 12169-12180.
- Reinsel, G. C., A. J. Miller, E. C. Weatherhead, L. E. Flynn, R. M. Nagatani, G.C. Tiao, D.J. Wuebbles, (2005). Trend analysis of total ozone data for turnaround and dynamical contributions, *Journal of Geophysical Research*, **110**, D16306.
- Salby M ve P. Callagan, (2000). Connection between the solar cycle and the QBO: the missing link *Journal of Climate*, **13**, 328-38.
- Solomon, S., R. W. Portmann, R. R. Garcia, L. W. Thomason, L. R. Poole ve M. P. McCormick, (1996). The role of aerosol variations in anthropogenic ozone depletion at northern midlatitudes, *Journal of Geophysical Research*, **101**, 6713-6727.
- Steinbrecht, W., B. Hassler, H. Claude, P. Winkler, R.S. Stolarski, (2006). Global distribution of total ozone and lower stratospheric temperature variations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **3**, 1421-1438.
- Tarasick, D. W., V. E. Fioletov, D.I. Wardle, J.B. Kerr, J. Davies, (2005). Changes in the vertical distribution of ozone over Canada from ozonesondes: 1980-2001, *Journal of Geophysical Research*, **110**, D02304.
- Varotsos, C, P. Kalabokas, G. Chronopoulos, (1994). Association of the laminated vertical ozone structure with the lower-stratospheric circulation, *Journal of Applied Meteorology*, **33**, 473-476.
- Viereck R, L. Puga, D. McMullin, D. Judge, M. Weber, W. Tobiska (2001). The Mg II index: a proxy for solar EUV. *Geophysical Research Letters*, **28**, 1343-1346.
- Weiss, A.K., J. Staehelin, C. Appenzeller, N.R.P.Harris, (2001). Chemical and dynamical contributions to ozone profile trends of the Payerne (Switzerland) balloon soundings, *Journal of Geophysical Research*, **106**, 19, 22685-22694.
- Zvyagintsev, A.M., G.M. Kruchenitskii, (2003). Relationship between Total Ozone Content in the Northern Hemisphere and the Arctic and North Atlantic Oscillations, *Atmospheric and Oceanic Physics*, **39**, 4, 456-460.
- Egorova, T., E. Rozanov, V. Zubov, W. Schmutz, Th. Peter, (2005). Influence of solar 11-year variability on chemical composition of the stratosphere and mesosphere simulated with a chemistry-climate model, *Advances in Space Research*, **35**, 3, 451-457.